中国生态农业学报 2016 年 12 月 第 24 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2016, 24(12): 1663−1673

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160640

微润管埋深与密度对日光温室番茄产量及品质的影响*

吕 望[1] 牛文全[1,2,3**] 古 君[2] 李 元[2] 邹小阳[3] 张若婵[1]

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100)

摘 要 为了探寻微润灌溉在日光温室的适宜应用技术参数, 以膜下滴灌为对照(CK), 设置 3 种微润管埋深(10 cm、20 cm、30 cm)和 3 种密度[2 行番茄埋设 1 条(1 管 2 行)、2 条(2 管 2 行)、3 条(3 管 2 行)微润管], 研究了微润管不同埋深及密度对日光温室番茄生长、产量及品质的影响。试验结果表明, 与 CK 相比, 微润灌溉更有利于日光温室番茄的生长。番茄的果实横径、单果质量、单果体积、总产量及灌溉水分利用效率增加显著, 分别较 CK 平均增加 8.58%、11.99%、18.79%、60.93%和 103.40%, 平均节水 37.73%。微润灌溉显著提高了番茄果实维生素 C、可溶性糖及糖酸比的含量, 较之 CK 平均增幅分别为 27.07%、4.48%和 21.38%。相同微润管密度下, 番茄的综合品质表现为: 埋深 30 cm>埋深 10 cm>埋深 20 cm; 相同埋深下, 表现为: 1 管 2 行>2 管 2 行>3 管 2 行。番茄的株高、茎粗、果实形态及总产量, 随微润管埋深的增加而减小, 随微润管密度的增加而增加, 茎粗与灌溉水分利用效率随微润管密度的增加而减小。综合考虑番茄的总产量、灌溉水分利用效率、品质以及微润管的经济成本等因素, 埋深 10 cm, 1 管 2 行(番茄总产量为 87.38 $t\cdot hm^{-2}$, 灌溉水分利用效率为 108.91 $kg\cdot m^{-3}$, 品质综合排序第 3)为日光温室番茄种植较为适宜的微润灌溉技术参数。

关键词 微润灌溉 埋深 密度 日光温室 番茄 产量 品质
中图分类号: S275.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)12-1663-11

Effects of moistube depth and density on tomato yield and quality in solar greenhouse*

LYU Wang[1], NIU Wenquan[1,2,3**], GU Jun[2], LI Yuan[2], ZOU Xiaoyang[3], ZHANG Ruochan[1]

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract Tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) is one of the vegetables widely cultivated in solar greenhouses in North China. As irrigation is the main source of soil moisture in solar greenhouse, it is very important to select appropriate irrigation methods and technical parameters to improve agricultural production, keep greenhouse air humidity, and reduce the incidence of pests and diseases. Moistube irrigation is a new underground irrigation technology with semi-permeable membrane as the core material which provides water to crop root zone soils in a slow and continuous flow. The advantages of this new irrigation technology include energy saving, low operation cost, easy operation, good anti-clogging performance, less deep leakage, etc. However, this technology is still in experimental stage and therefore has not been applied at large scale, and some important parameters needed to be optimized. In this experiment, drip irrigation with mulch was used as control to explore suitable technical parameters of moistube irrigation in solar greenhouse conditions. Three depths (10, 20, 30 cm) and three densities (one, two and three moistubes with two lines of tomatoes in one planting ridge, respectively expresses as 1 tube with 2 lines, 2

* 国家科技支撑计划课题(2015BAD24B01)资助
** 通讯作者: 牛文全, 主要从事灌溉理论与节水新技术研究。E-mail: nwq@vip.sina.com
吕望, 主要从事灌溉理论与节水新技术研究。E-mail: ysgzlw@163.com
收稿日期: 2016−07−19 接受日期: 2016−09−18
* The study was supported by the National Key Technology R&D Program of China (2015BAD24B01).
** Corresponding author, E-mail: nwq@vip.sina.com
Received Jul. 19, 2016; accepted Sep. 18, 2016

tubes with 2 lines, 3 tubes with 2 lines) were set up to study the effect of different depths and densities of moistube on the growth, yield and quality of tomato in solar greenhouse conditions. The experiment was done from October 2015 through April 2016 in a 108 m by 8 m solar greenhouse (108°02′E, 34°17′N) in Yangling Agricultural Hi-tech Industries Demonstration Zone, Shaanxi Province, China. The results showed that moistube irrigation enhanced the growth of tomato compared with the drip irrigation with mulch. Compared with control, moistube irrigation increased fruit diameter, weight, volume, total yield and irrigation water use efficiency by 8.58%, 11.99%, 18.79%, 60.93% and 103.40%, respectively. Our results suggested that water-saving under moistube irrigation conditions was as high as 37.73%. For tomato quality, compared with control, the contents of vitamin C, soluble sugar and sugar-acid ratio also increased under moistube irrigation, with average increasing rates of 27.07%, 4.48% and 21.38%, respectively. In terms of comprehensive quality of tomato, the moistube depth was in the order of 30 cm > 10 cm > 20 cm under the same moistube density, the moistube density was in order of 1 tube with 2 lines > 2 tubes with 2 lines > 3 tubes with 2 lines under the same moistube depth. In general, plant height, stem diameter, fruit shape and total yield of tomato decreased with increasing moistube depth. These parameters also increased with increasing moistube density. However, stem diameter and irrigation water use efficiency decreased with increasing moistube density. Based on total yield, irrigation water use efficiency and quality of tomato and the economic cost of moistube and other factors, 10 cm depth and 1 tube with 2 lines (with total tomato yield of 87.38 $t\cdot hm^{-2}$, irrigation water use efficiency of 108.91 $kg\cdot m^{-3}$, and third in comprehensive quality rank) were the most suitable technical parameters for moistube irrigation in solar greenhouse condition.
Keywords Moistube irrigation; Moistube buried depth; Moistube density; Solar greenhouse; Tomato; Yield; Quality

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)，是茄科(Solanaceae)番茄属(*Lycopersicon*)一年生或多年生草本植物，其果实营养丰富，味道鲜美，深受人们喜爱，是我国北方广泛栽培的蔬菜之一。随着社会经济的发展，越来越多的反季节蔬菜走进了人们的日常生活，日光温室作为现代设施农业生产方式之一，广泛应用于光照资源丰富的北方大部分地区[1]，为反季节蔬菜种植提供了良好条件，目前温室番茄种植在番茄产业中的比例逐年增大。水分对番茄的生长发育至关重要，日光温室长期处于封闭状态，灌溉水是土壤水分的最主要来源，因此合适的灌溉方法及技术参数在日光温室灌溉中尤为重要，对于提高设施农业产量、保持温室内空气湿度、减小病虫害的发生等具有重要作用。

近年来，就微灌对设施作物的生长发育、产量、品质及水分利用效率等开展了大量研究，提出了许多适宜的日光温室微灌技术应用方式[2–6]。然而微灌技术特别是滴灌，一次性投资较大，能耗较高，并存在易堵塞、灌水均匀性差、运行管理需要一定技术基础等缺点[7]。目前我国广大地区以个体农户经营为主的温室种植模式[8]进一步限制了微灌技术的应用。微润灌溉以微量连续供水方式对作物进行灌溉，具有节能、运行成本低、易操作、抗堵塞性能好、深层渗漏小等优点[8–10]。目前采用室内土箱模拟方式，已就土壤质地、埋深、压力和初始含水率等对微润灌溉湿润体运移规律、微润管适宜埋深等应用模式开展了研究[11–13]。如何玉琴等[14]研究表明微润管的埋设深度、间距和压力对玉米(*Zea mays* L.)的产量和水分利用效率都有显著的影响，间距对耗水量的影响较大。薛万来等[15]试验表明，微润灌溉下番茄的产量和水分利用效率均优于滴灌处理。魏镇华等[16]研究表明，交替控水条件下微润灌溉具有更大的节水潜力。张子卓等[17]研究认为，微润管埋深 15 cm 有利于番茄生长，且光合速率和水分利用效率最大。

水分被作物有效吸收利用不仅取决于适时适量地供给，还取决于灌水的空间有效性，即灌水深度[18]。微润管埋深与密度直接影响土壤水分的空间运移与分布，进而影响作物根系的生长和对水分、养分的吸收利用[19–20]。因此，微润管埋深和密度是影响微润灌溉应用的重要技术参数。目前关于这两个因素对番茄生长和产量的研究较少，尤其是关于番茄品质的影响研究更是鲜有报道。为此，本研究以膜下滴灌方式为对照，以日光温室番茄为供试作物，研究不同的微润管埋深和微润管密度对番茄生长、产量及品质的影响，以期得到最佳的埋深和密度组合，为微润灌溉在设施农业种植中的推广应用提供参考依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验场地

试验于 2015 年 10 月—2016 年 4 月在陕西省杨凌农业高新技术产业示范区西北部的大寨镇日光温室内进行。试验地位于 108°02′E, 34°17′N，年平均气温 13℃，海拔 520 m 左右，属暖温带半湿润气候带，年均降雨量 550~650 mm，主要集中在 7—9 月份，年均蒸发量 1 400 mm，全年无霜期 210 d。试验日光温室东西长 108 m，南北宽 8 m，脊高 3.8 m，前茬种

植作物为西瓜(*Citrullus ianayus* Mastum.)和甜瓜(*Cucumis melo* L.)。日光温室内土壤为塿土，其中砂砾(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm)分别占 25.4%、44.1%、30.5%，土壤质地为粉砂质壤土，干容重为 1.39 g·cm^{-3}，孔隙度为 49.38%。耕层土壤(0~30 cm)有机质、全氮、全磷及全钾含量分别为 16.48 g·kg^{-1}、960 mg·kg^{-1}、360 mg·kg^{-1}、1 040 mg·kg^{-1}，pH 为 7.89，田间质量持水率为 23.63%。

1.2　试验材料

供试番茄品种为‘海地’，日光温室内穴盘育苗，2015 年 10 月 1 日定植，定植和缓苗统一采用沟灌灌水，所有小区共灌水 40.26 mm，不计入生育期总灌水量。试验种植小区长 5.5 m，宽 1.5 m。采取当地典型的沟垄覆膜种植模式，1 垄种植 2 行番茄，垄宽 50 cm，垄高 15 cm，两垄中心距离 1.5 m，为防止各垄间水分互相渗透干扰试验，相邻两垄间用埋深 1 m 的建筑防水膜(SBS)隔开。番茄株距 30 cm，行距 30 cm，每个小区种植 36 株。试验所用微润管(深圳市微润灌溉技术有限公司)壁厚 1 mm，管径 16 mm，单条毛管铺设长度和垄长(5.5 m)一致。微润灌溉系统由供水箱、铁支架、水表、干管、上水管、下水管、支管和毛管(微润管)组成。水箱支架总高 1.5 m，为了保持稳定埋入地下 0.4 m，水箱高 0.9 m，故试验压力水头为 1.2~1.7 m。

1.3　试验设计

本试验以膜下滴灌处理为对照。微润管埋深设置 3 个水平：10 cm、20 cm、30 cm；微润管密度设置 3 个水平：2 行番茄铺设 1 条(1 管 2 行)、2 条(2 管 2 行)、3 条(3 管 2 行)微润管。采取完全组合设计，试验共 10 个处理，每种处理重复 3 次，共计 30 个小区。试验种植小区布置示意图见图 1。膜下滴灌的灌水下限为 75%田间持水量，上限为 90%田间持水量。微润管流量随埋深的不同而略有差异，埋深 10 cm 为 81.85 mL·m^{-1}·h^{-1}，埋深 20 cm 为 77.45 mL·m^{-1}·h^{-1}，埋深 30 cm 为 74.33 mL·m^{-1}·h^{-1}。故本试验按照 3 种不同的埋深分为 3 个大区，每个大区由一个独立水箱进行供水，所有小区的施肥、除草、打药等田间农艺管理措施一致。具体试验设计见表 1。

表 1　试验设计
Table 1　Experimental design

处理 Treatment	微润管埋深 Moistube depth (cm)	微润管密度 Moistube density
P1D10	10	1 管 2 行　One tube with two lines
P2D10	10	2 管 2 行　Two tube with two lines
P3D10	10	3 管 2 行　Three tube with two lines
P1D20	20	1 管 2 行　One tube with two lines
P2D20	20	2 管 2 行　Two tube with two lines
P3D20	20	3 管 2 行　Three tube with two lines
P1D30	30	1 管 2 行　One tube with two lines
P2D30	30	2 管 2 行　Two tube with two lines
P3D30	30	3 管 2 行　Three tube with two lines
CK	膜下滴灌　Drip irrigation with plastic mulching	

“1 管 2 行”代表 1 垄布置 1 条微润管，种植 2 行番茄。‘One tube with two lines’ means one moistube is arranged in one ridge with two lines of tomato.

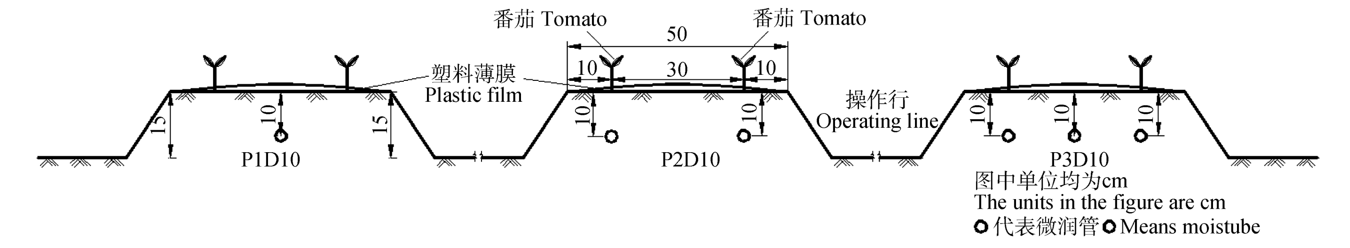


图 1　微润管埋深 10 cm 的试验种植小区断面示意图
Fig. 1　Sketch map of experimental planting plots with moistube buried depth of 10 cm

1.4　测定指标及方法

株高、茎粗：定植 18 d 后开始测定，每隔 10 d 测定一次，直至打顶(4 层果时打顶)为止，每个小区选取长势一致的 3 株样本进行测量。株高用卷尺自植株基部量取，茎粗用十字交叉法，利用电子游标卡尺测量，并取其均值。

果实形态：在番茄的盛果期，每个处理选取 3 株进行测量，果实横径、纵径用电子游标卡尺测定，果形指数=纵径/横径，果实质量用电子秤(0.01 g)称量，果实体积采取排水法测定，果实密度=质量/体积。

产量：分别对第 1 层果至第 4 层果依次进行测定，总产量为 4 层果产量累加，并折算成单位面积的总产量。

品质：在番茄结果盛期，每个小区选取 3 个发育状况一致的果实，用榨汁机打成匀浆，取其浆液进行测定。可溶性固形物采用 RHBO-90 型号手持折射仪(Link, Co. Ltd, Taiwan, China)测定。维生素 C 采用钼蓝比色法测定。有机酸采用 0.1 mol·L^{-1} 的 NaOH

溶液进行滴定。可溶性糖采用硫酸–蒽酮比色法测定。糖酸比=可溶性糖/有机酸。

灌水量：微润灌溉的灌水量由供水箱控制，3 个水箱按顺序依次加水，每次加水均加至同一高度；膜下滴灌的灌水量由水表控制。

含水量：每隔 30 d，在垄中间采用土钻取土，取土总深度为 60 cm(按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm 分层)，烘干法测定土壤质量含水量，即土壤质量含水量(%)=(鲜土质量–干土质量)/干土质量×100%。

灌溉水分利用效率计算公式为：

$$IWUE = Y/I \tag{1}$$

式中：IWUE 为灌溉水分利用效率 $kg·m^{-3}$；I 为实际灌水量，$m^3·hm^{-2}$；Y 为番茄产量，$kg·hm^{-2}$。

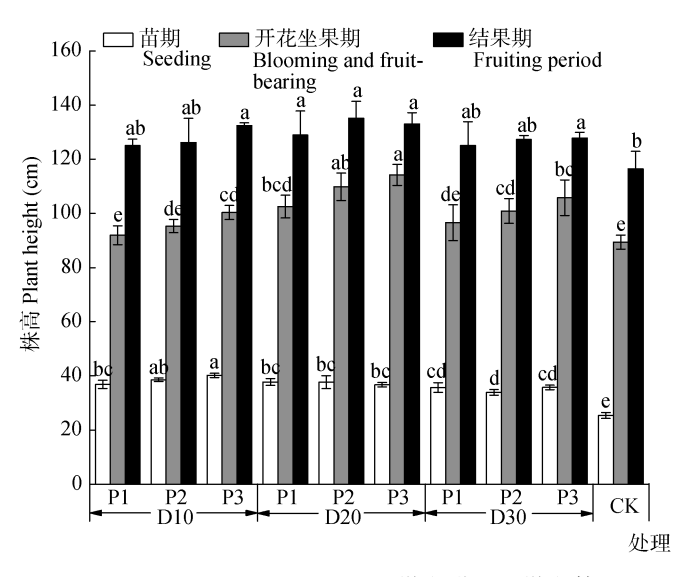
1.5 数据处理

试验所采集的数据用 Microsoft Excel 2010 软件进行整理，用 SPSS 22.0 统计软件进行番茄品质指标的主成分分析，采用 Duncan's 新复极差法进行显著性检验和交互作用方差分析，利用 OriginPro 2015 软件作图。

2 结果与分析

2.1 微润灌溉的微润管埋深和密度对番茄株高、茎粗的影响

不同处理番茄各个生育阶段株高、茎粗的变化如图 2 所示。不同处理对番茄的株高、茎粗均有显著影响。苗期，株高随微润管埋深的减小而增加，随微润管密度的增加而增加，P3D10 处理最大，较 CK 处理提高 58.27%，P1D30 处理最小，但也比 CK 处理高 33.62%，苗期番茄根系经过移栽扰动，处于根系吸收功能的恢复期，发育较短，因此埋深较浅水量较大的 P3D10 处理株高生长最快。开花坐果期，随着番茄的根系不断向纵深生长，此阶段株高随埋深的增加先增加后减小，埋深 20 cm 的平均株高最大，微润管埋深过浅或过深均不适合此阶段番茄株高的生长，该阶段最优处理为 P3D20，较 CK 处理提高 27.70%。结果期，微润灌溉各处理与 CK 处理有显著差异，而不同微润灌溉处理间株高无显著差异，主要是后期植株的生长逐渐由营养生长转变为生殖生长。从整个生育期来看，微润灌溉较膜下滴灌显著促进了番茄株高的生长，至生育期末株高平均增加 10.76%。茎粗是衡量植株是否健壮的重要指标，在一定程度上反映了植株输送营养物质及水分的能力。番茄茎粗呈现出随微润管埋深的增加而减小，随微润管密度的增加而减小的趋势。不同微润灌溉处理中，各生育阶段均为 P1D10 处理最大，P3D30 处理最小，至生育期末微润灌溉处理的茎粗较 CK 有所降低，平均减小 4.79%。总体上，P3D10 处理最有利于番茄株高、茎粗的生长。



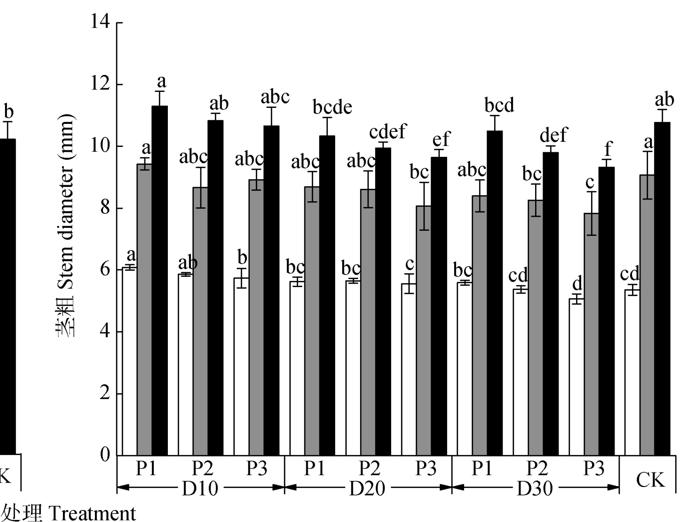


图 2 微润灌溉下微润管埋深和密度对番茄株高、茎粗的影响

Fig. 2 Effects of moistube depth and density on plant height and stem diameter of tomato under moistube-irrigation

图中不同小写字母表示相同生育期不同处理之间差异达到显著水平($P<0.05$)。Different lowercase letters at the same stage in the figure mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

2.2 微润灌溉的微润管埋深和密度对番茄果实形态的影响

对番茄结果盛期的果实形态指标进行了方差分析，番茄的平均单果密度介于 0.91~1.05 $g·cm^{-3}$，但各处理之间无显著性差异，故在表 2 未列出。

从表 2 可知，P3D10 处理果实的横径、平均单果

质量以及平均单果体积最大，较 CK 处理分别提高 17.44%、30.12%和 35.97%，增幅显著。P1D30 处理果实的横径、纵径、平均单果质量以及平均单果体积均在所有处理中最小，分别较 CK 处理降低 2.15%、2.26‰、5.99%和 4.17%，降幅不显著，基本与 CK 处理持平。埋深对番茄果实的横径、果形指数、平均单果质量以及平均单果体积影响达显著水平(P<0.05)，微润管密度对此的影响达极显著水平(P<0.01)，而二者交互作用对番茄果实形态无显著性影响。大体上，番茄果实形态指标有随微润管埋深的增加而减小，随微润管密度的增加而增加的趋势，3 种不同埋深下，平均单果质量最大值均出现在 3 管 2 行布置密度下。微润灌溉较膜下滴灌提高了番茄的横径、纵径、平均单果质量及体积，最优处理为 P3D10。

表 2　微润灌溉下微润管埋深和密度对番茄果实形态的影响

Table 2　Effects of moistube depth and density on fruit shape of tomato under moistube-irrigation

处理 Treatment	果实横径 Fruit diameter (mm)	果实纵径 Fruit length (mm)	果形指数 Fruit shape index	平均单果质量 Average fruit weight (g)	平均单果体积 Average fruit volume (cm^3)
P1D10	80.53±2.96b	60.57±1.90ab	0.75±0.02ab	185.81±10.33cde	200.93±21.02a
P2D10	82.35±3.32ab	59.80±3.37ab	0.73±0.03bc	211.18±13.21ab	218.29±24.20a
P3D10	86.85±3.99a	61.79±2.25ab	0.71±0.01c	226.35±10.62a	226.62±17.63a
P1D20	77.99±4.31bc	59.42±2.43ab	0.76±0.01ab	180.64±11.88de	198.52±14.29a
P2D20	79.72±1.34b	59.27±1.90b	0.74±0.01ab	199.31±15.24bcd	207.59±9.50a
P3D20	82.99±2.54ab	59.04±1.29b	0.71±0.04c	209.45±13.81abc	221.11±21.89a
P1D30	72.39±0.90d	57.28±1.25b	0.79±0.03a	164.13±6.60e	159.72±2.92b
P2D30	82.12±3.21ab	61.17±1.99ab	0.74±0.03ab	192.77±23.59bcd	204.45±17.46a
P3D30	83.09±1.93ab	63.85±3.89a	0.77±0.03ab	209.31±11.91abc	209.89±17.93a
CK	73.95±1.87cd	57.41±1.62b	0.78±0.02a	173.96±1.53e	166.67±17.56b
			F 值 F value		
微润管埋深 Moistube depth (D)	4.621*	1.167ns	5.112*	4.370*	4.456*
微润管密度 Moistube density (P)	14.305**	2.411ns	5.727*	17.780**	8.446**
D×P	1.932ns	1.906ns	0.956ns	0.287ns	0.971ns

表中数据为平均值±标准差，同列数据不同小写字母表示差异达显著水平(P<0.05)，*和**分别表示在 P<0.05 和 P<0.01 水平上差异显著，ns 表示无显著性差异(P>0.05)，下同。Values represent mean ± S.D. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. * and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns means no significant difference at 0.05 level. The same below.

2.3　微润灌溉的微润管埋深和密度对番茄产量的影响

2.3.1　单株产量

番茄单株产量的大小和果数的多少，是直接影响总产量的高低的主要因素。本试验分别对第 1 层至第 4 层果(膜下滴灌处理第 4 层果几乎没有，故仅统计前 3 层果)的单株产量进行了统计分析，其结果如图 3 所示。不同处理对单株产量和果数影响显著(P<0.05)。与 CK 处理相比，微润灌溉显著提高了番茄的单株产量及单株果数，番茄的单株产量提高 19.04%~78.46%，单株果数增加 21.51%~40.27%。整体上看，P3 水平和 D10 水平单株产量最高，番茄的单株产量随微润管埋深的增加而减小，随微润管密度的增加而增加。P3D10 处理单株产量最高(2.41 kg)，P2D10(2.18 kg)和 P3D30(2.10 kg)次之；P1D30 处理最低(1.61 kg)，这与前文的果实形态分析结果相一致，埋深 30 cm 条件下，1 管 2 行最不利于番茄果实的生长。

2.3.2　总产量及灌溉水分利用效率

由表 3 可知，不同微润灌溉处理番茄的总产量及灌溉水分利用效率均显著高于膜下滴灌处理，增产率高达 78.66%，节水率高达 70.28%。埋深及密度对总产量影响达到极显著水平(P<0.01)，二者交互作用对总产量影响显著(P<0.05)，其影响大小顺序为密度>埋深>二者交互作用。埋深对灌溉水分利用效率无显著性影响，密度及二者交互作用对灌溉水分利用效率影响极显著(P<0.01)，其影响大小顺序为密度>二者交互作用>埋深。

同一微润管密度下，总产量和灌溉水分利用效率随埋深的增加而减小；同等埋深下，总产量随微润管密度的增加而增加，灌溉水分利用效率随微润管密度的增加而减小，P3 与 P2 水平的总产量无显著差异，但 P2 水平的灌溉水分利用效率却显著高于 P3 水平，说明 3 管 2 行布置密度较 2 管 2 行增产节

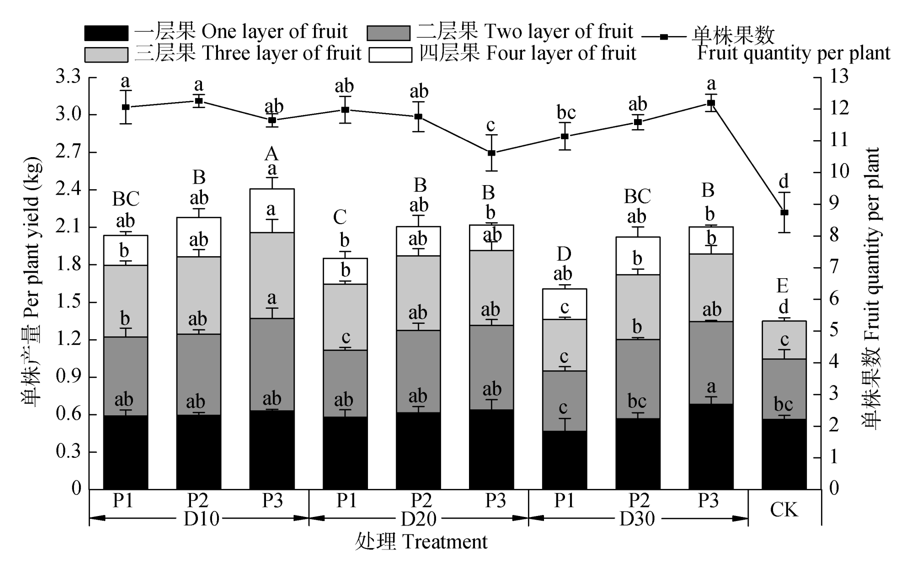


图 3 微润灌溉下微润管埋深和密度对番茄单株果数量及产量的影响

Fig. 3 Effects of moistube depth and density on fruit quantity per plant and yield per plant of tomato under moistube-irrigation

不同小写字母表示不同处理相同果层差异达到显著水平($P<0.05$)，不同大写字母表示不同处理单株总产量差异达到显著水平($P<0.05$)。Different lowercase letters at the same fruit layer mean significant differences at 0.05 level among different treatments. Different capital letters mean significant differences in total yield per plant at 0.05 level among different treatments.

表 3 微润灌溉下微润管埋深和密度对番茄总产量及灌溉水分利用效率的影响

Table 3 Effects of moistube depth and density on fruit total yield and irrigation water use efficiency of tomato under moistube-irrigation

处理 Treatment	总灌水量 Total water irrigation (mm)	总产量 Total yield ($t\cdot hm^{-2}$)	灌溉水分利用效率 Irrigation water use efficiency ($kg\cdot m^{-3}$)	节水率 Water-saving rate (%)	增产率 Yield-increasing rate (%)
P1D10	80.24	87.38±2.46ab	108.91±3.06a	67.31	60.37
P2D10	160.47	94.65±3.13ab	58.98±1.95c	34.62	73.71
P3D10	240.71	97.35±8.05a	40.44±3.34d	1.93	78.66
P1D20	76.05	84.33±6.54b	110.89±8.60a	69.02	54.76
P2D20	152.09	88.62±5.19ab	58.27±3.41c	38.04	62.63
P3D20	228.14	89.49±3.16ab	39.23±1.38d	7.05	64.23
P1D30	72.96	68.36±6.11c	93.70±8.37b	70.28	25.45
P2D30	145.91	87.16±5.85b	59.73±4.01c	40.55	59.96
P3D30	218.87	91.89±2.66ab	41.98±1.22d	10.83	68.63
CK	245.45	54.49±7.93d	33.44±5.84d	—	—
F 值 *F* value					
微润管埋深 Moistube depth (D)		9.644**	2.520ns		
微润管密度 Moistube density (P)		15.601**	439.795**		
D × P		2.885*	4.889**		

水效果不明显。从管道系统投资、产量及灌溉水分利用效率等角度来看，微润灌溉的最优处理为 P1D10，该处理较 CK 增产 60.37%，节水 67.31%，虽然较总产量最高的 P3D10 处理减产 11.41%，差异不显著，但却节水 66.67%，灌溉水分利用效率提高 62.87%，该处理灌溉系统的成本投资大大降低，且 10 cm 的埋深也更有利于田间的实际操作。

2.4 微润灌溉的微润管埋深和密度对番茄果实品质的影响

2.4.1 单项品质指标

由表 4 可知，埋深对番茄果实可溶性固形物和有机酸含量影响显著($P<0.05$)，而对维生素 C、可溶性糖含量以及糖酸比影响达极显著水平($P<0.01$)。维生素 C 含量随埋深增加而增加，而可溶性糖含量与糖酸比则随埋深的增加先减小后增加。微润管密度对糖酸比无显著性影响，而对其余 4 个指标的影响达到极显著水平($P<0.01$)，维生素 C、可溶性糖、有机酸含量呈随微润管密度增多而降低的趋势。二者交互作用下，对可溶性固形物、维生素 C、有机酸含量无显著影响，对可溶性糖含量影响极显著($P<0.01$)，对糖酸比影响显著($P<0.05$)。

从表 4 还可以看出，微润灌溉较膜下滴灌显著提

表 4　微润灌溉下微润管埋深和密度对番茄品质的影响

Table 4　Effects of moistube depth and density on fruit quality of tomato under moistube-irrigation

处理 Treatment	可溶性固形物 Soluble solids (%)	维生素 C Vitamin C [mg·(100g)$^{-1}$]	有机酸 Organic acid (%)	可溶性糖 Soluble sugar (%)	糖酸比 Sugar-acid ratio
P1D10	5.87±0.06a	16.52±0.38cd	0.37±0.01a	2.61±0.15b	6.99±0.49c
P2D10	5.60±0.10bc	14.00±0.73e	0.33±0.02abc	2.35±0.12c	7.16±0.60c
P3D10	5.80±0.10ab	13.09±0.55e	0.26±0.02d	2.11±0.05de	8.09±0.57bc
P1D20	6.00±0.20a	17.24±0.31bc	0.38±0.04a	1.94±0.16ef	5.08±0.17c
P2D20	5.50±0.10c	16.02±0.84d	0.34±0.02ab	1.77±0.14fg	5.25±0.71d
P3D20	5.97±0.06a	15.74±0.42d	0.31±0.05bc	1.69±0.08g	5.49±0.51d
P1D30	5.80±0.30ab	19.38±0.51a	0.33±0.01abc	3.07±0.11a	9.38±0.55a
P2D30	5.20±0.10d	17.89±0.68b	0.31±0.02bc	2.65±0.09b	8.58±0.80ab
P3D30	5.93±0.06a	17.68±0.89b	0.28±0.03cd	2.19±0.17cd	7.83±0.80bc
CK	5.97±0.15a	12.90±0.71e	0.38±0.05a	2.17±0.13bcd	5.84±0.90d
		F 值　*F* value			
微润管埋深 Moistube depth (D)	3.630*	83.472**	4.394*	107.071**	69.427**
微润管密度 Moistube density (P)	31.907**	31.611**	18.096**	43.195**	0.168ns
D × P	2.796ns	2.280ns	1.261ns	5.135**	3.933*

高了番茄的维生素 C 含量, 增幅为 1.47%~50.23%; 对于可溶性糖和糖酸比, 虽并未全部优于 CK 处理, 但整体上较 CK 处理还是有所提高, 平均增幅分别为 4.48%和 21.38%。两种灌水方法对可溶性固形物的含量影响不大, 略有显著性差异。不同的微润灌溉处理中, P1D30 处理维生素 C、可溶性糖含量和糖酸比最高; P1D20 处理可溶性固形物和有机酸含量最大(较 CK 处理无显著差异), 但该处理糖酸比最低, 口味较差。

2.4.2　综合品质指标

对番茄的品质进行综合评价时, 单项指标往往难以判断综合品质, 为了更全面地反映各处理对番茄品质的影响, 采用主成分分析方法, 对番茄的可溶性固形物(x_1)、维生素 C(x_2)、有机酸(x_3)、可溶性糖(x_4)和糖酸比(x_5)5 项指标进行了综合评价分析。由表 5 可知, 前 3 项特征根的累积贡献率为 87.68%>85.0%, 可用前 3 项作为评价的综合指标, 评价可信度为 87.68%。以前 3 项主成分的贡献率为权重系数, 得到主成分的综合得分 Z 值, 表达式如下:

$$Z=0.477\,4Z_1+0.241\,4Z_2+0.158\,0Z_3 \qquad (2)$$

综合评价指标 Z 值(表 6)的大小, 代表了番茄综合品质的高低, 微润灌溉整体上较膜下滴灌提高了番茄的综合品质。从表 6 还可看出, 埋深 30 cm 条件下, 番茄的综合品质最好; 相同微润管密度下, D30>D10>D20, 相同埋深水平下, Z 值的大小均为 P1>P2>P3, 说明 1 管 2 行的方式有利于番茄综合品质的提升。从番茄综合品质角度来看, 最优处理为 P1D30, P2D30 次之。

表 5　主成分分析中番茄各品质指标参数主要主成分的特征根、贡献率及累积贡献率

Table 5　Eigenvalues, contribution rate and cumulative contribution rates of main principle components of tomato quality index parameters under principal component analysis

主成分 Principle component	特征根 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate (%)	累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)
1	2.387 0	47.74	47.74
2	1.206 9	24.14	71.88
3	0.790 2	15.80	87.68
4	0.613 3	12.27	99.95
5	0.002 7	0.05	100.00

2.5　微润灌溉的微润管埋深和密度对土壤水分的影响

由图 4 可知, 不同微润灌溉处理的番茄根区土壤水分随土层深度的增加而减小, 土壤含水量的峰值随微润管埋深的不同而改变, 不同处理含水量的最大值均出现在微润管附近, 并向管上下减小, 这也验证了前人土箱模拟试验的结果[13]。相同埋深水平下, 同一土层深度的土壤含水量随微润管密度的增加而增加, P3 水平含水量最高。2013 年农业部颁布的《水肥一体化技术指导意见》中提出[21], 蔬菜类的适宜湿润深度为 20~30 cm, 灌溉控制上限为田间持水量的 85%~95%, 下限为田间持水量的 55%~65%。由图 4 可看出, 0~30 cm 土层含水量保持在田间持水量的 75%~90%(P1D30 除外), 说明微润小流量连续灌溉满足了作物整个生育期的正常需水要求。

表 6 微润灌下微润管埋深和密度对灌溉番茄品质指标的综合评价结果

Table 6 Comprehensive evaluation results of tomato quality under different moistube depths and densities of moistub-irrigation

处理 Treatment	Z_1	Z_2	Z_3	Z	排序 Sort
P1D10	0.0727	1.2032	0.1591	0.3503	3
P2D10	0.0393	−0.5188	−0.5856	−0.1990	6
P3D10	0.0974	−1.9349	0.8729	−0.2826	7
P1D20	−1.0565	1.2776	0.0312	−0.1911	5
P2D20	−0.6702	−0.2767	−1.6218	−0.6430	10
P3D20	−0.9878	−0.4727	0.4794	−0.5099	9
P1D30	1.6569	1.0949	0.9027	1.1979	1
P2D30	1.5257	−0.2733	−1.6292	0.4049	2
P3D30	0.4164	−0.4548	1.2302	0.2834	4
CK	−1.0938	0.3556	0.1611	−0.4109	8

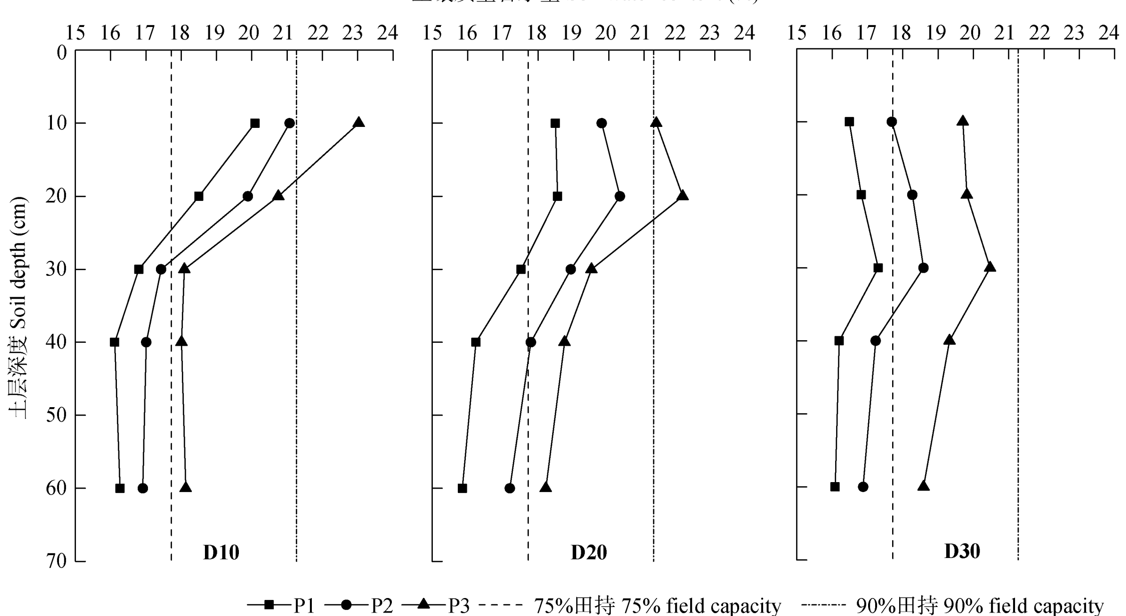


图 4 微润灌溉下不同微润管埋深和密度的番茄根区土壤 0~60 cm 土层含水量

Fig. 4 Changes of soil water contents in 0–60 cm soil layers of tomato root zone under different moistube depths and densities of moistub-irrigation

3 讨论

试验结果表明，微润灌溉较之膜下滴灌更有利于日光温室番茄的生长，总产量、灌溉水分利用效率及品质均有显著提高，体现出了小流量连续灌溉的优越性，达到节水、增产、优质的目的。

3.1 微润灌溉对番茄生长的影响

株高、茎粗是直接反映植株长势的重要指标，不同生育期植株的株高、茎粗受自身遗传因子和外在环境因子的双重影响。本试验结果表明，与膜下滴灌相比至生育期末，微润灌溉的番茄株高平均增加 10.76%，茎粗略有减小。张明智等[22]认为夏玉米苗期株高、茎粗随微润管布置的密集程度而增加。本研究番茄的株高有相似结论，茎粗则与之趋势相反，这可能与试验场地及不同作物的耗水规律不同有关。研究发现，番茄的株高和茎粗均随微润管埋深的增加而减小，埋深 10 cm，3 管 2 行条件下，番茄长势最好。这是由于番茄 0~20 cm 根长密度最大[23]，浅埋时，水分可直接被根系吸收，而深埋时，水分需向上扩散到根区土壤才能被植株吸收利用，根系吸水出现了一定的滞后性。单从植株长势来看，密管浅埋式更好，这与刘国宏等[24]研究结论相一致。

3.2 微润灌溉对土壤水分及番茄产量的影响

何玉琴等[14]和蔡焕杰等[25]认为不同毛管间距对土壤水分分布有较大影响，并对作物产量造成影响；牛文全等[12]认为微润管的埋深主要影响土壤水分垂向的湿润程度。本试验结果表明，P3 水平，0~60 cm 深度含水量均处于田间持水量的 75%~90%，而番茄

主要根系分布在 5~30 cm 土层[26], 因此 40 cm 以下水分难以被植株所吸收利用(由图 4 也可看出 40 cm 以下土壤水分变化不大, 趋于稳定), 造成了水分的浪费, 灌溉水分利用效率较低, 这解释了 P3 较 P2 灌水量大的多, 但产量却无显著性差异。同一位置相同深度下, 随着微润管密度的增加, 番茄根区土壤平均含水量也在增加, 番茄平均单果质量、单株产量以及总产量都有增加之趋势, 但水分利用效率有所降低, 这与前人研究结果一致[27]。P3 水平下, 番茄的单果质量、单株产量以及总产量最大。随着埋深的增加, 番茄的总产量有所降低, D30 水平最低, 这与蒋树芳等[28]关于地下滴灌毛管埋深对番茄产量的影响结论恰好相反, 可能与灌溉技术的不同有关。微润灌溉为连续性灌水, 通水后形成以微润管为轴心的近似圆柱形湿润体[29], 土壤孔隙将长时间处于充水状态, 植物根系或许受到了程度不一的低氧胁迫。埋深 10 cm 下, 地表范围内土壤气体与大气进行气体交换相对充足[30], 而埋深 20 cm、30 cm 下, 根区土壤与大气进行气体交换较为困难, 所以随着埋深的增加, 根系所受低氧胁迫程度也在增加, 最终导致总产量随埋深的增加而减小。P1D30 处理无论是果实横径、单果质量、单株产量以及总产量, 均是所有处理最小的, 该处理下微润管出流量最小, 土壤平均含水量最低, 可能受到了低水和低氧双重胁迫, 对植株后期的生殖生长造成了不利影响。地下滴灌属于间歇性灌溉, 在灌水间歇期, 土壤孔隙得以补充气体, 保证了植株根系的正常生长。本试验还发现, 埋深 10 cm 条件下单果质量、总产量及灌溉水分利用效率最高, 这与张子卓等[17]春夏茬番茄试验的最优埋深(15 cm)不大一样, 可能是由于试验条件及季节的不同导致的, 本试验所种番茄为越冬茬, 气温较低, 番茄的耗水量明显低于春夏茬, 加之采用覆膜微润灌溉方式, 很大程度上减缓了表层土壤水分蒸发, 因此埋深 10 cm 产量及水分利用效率都较高。

3.3　微润灌溉对番茄品质的影响

品质是除产量外决定果蔬经济效益的又一重要因素, 随着人们日常生活水平的逐渐提高, 在追求果形、质量等外在品质指标的同时, 营养品质等指标也受到越来越多的关注。番茄的品质可分为保健品质和风味品质两大类, 其中维生素 C 属于保健品质, 可溶性固形物、有机酸、可溶性糖、糖酸比等属于风味品质[31]。本研究结果表明, 与 CK 相比, 微润灌溉对番茄的品质有所改善, 尤其是显著提高了维生素 C 含量。维生素 C 含量有随微润管密度的增多而降低的趋势, 这主要是随着微润管密度的增多, 微润管出流量增大(图 4), 过多的水分所产生的稀释作用所导致[32-33], 可溶性糖与有机酸的变化与维生素 C 的变化趋势相一致。P3 水平下, 维生素 C、可溶性糖、有机酸含量最低; P1 水平下最高, 这是因为 P1 水平灌水较少, 引起用于果皮渗透调节的水分减少, 导致维生素 C 含量提高, 同时通过韧皮部进入果实中的糖浓度增加[34]。随着埋深的增加维生素 C 含量有升高趋势, 而可溶性糖与糖酸比则呈现出先减小后增加的趋势, 埋深 20 cm 时可溶性糖含量与糖酸比达到最低, 埋深 30 cm 时最高, 这与地下滴灌不同埋深对番茄品质的影响研究结论大体一致[28,35]。

综合考虑产量、灌溉水分利用效率及品质, P3D10 处理总产量最高, 但灌溉水分利用效率较低(40.44 kg·m^{-3}), 综合品质较差(排序第 7); P1D30 处理综合品质最高(排序第 1), 但其单果质量(164.13 g)和总产量(68.36 t·hm^{-2})却是各处理中最低的; P1D10 处理番茄的茎杆最粗, 株高和总产量虽低于 P3D10 处理, 但并未达到显著水平, 其灌溉水分利用效率(108.91 kg·m^{-3})却显著高于 P3D10 处理, 且该处理的综合品质也较高(排序第 3), 达到了既高产优质又节约灌水量的目的。

压力水头也是决定微润管出流的重要因素, 研究表明, 土壤累积入渗量与压力水头成正比关系[12], 而本试验中由于条件有限, 忽略了压力水头的影响, 以后可进一步综合考虑微润灌溉压力水头对作物生长的影响, 制定作物不同生育阶段的适宜压力水头范围。

4　结论

1)整体上, 微润灌溉较之膜下滴灌更有利于日光温室番茄的生长, 果实横径、平均单果质量、单果体积、总产量及灌溉水分利用效率增加显著, 果实横径增加 8.58%, 单果质量增加 11.99%, 单果体积增加 18.79%, 平均增产率为 60.93%, 灌溉水分利用效率增加 103.40%, 平均节水率为 37.73%。对于番茄品质, 微润灌溉显著提高了维生素 C、可溶性糖含量及糖酸比, 较之 CK 处理平均增幅分别为 27.07%、4.48%和 21.38%。

2)不同微润灌溉处理中, 对番茄果实横径、单果质量、单果体积及总产量的影响顺序为微润管密度>埋深>二者交互作用; 对灌溉水分利用效率的影响顺序为微润管密度>二者交互作用>埋深。番茄的株高、茎粗、果实形态、总产量, 大体上随微润管埋

深的增加而减小，随微润管密度的增加而增加，茎粗及灌溉水分利用效率随微润管密度的增加而减小。番茄综合品质，相同微润管密度下，埋深 30 cm>埋深 10 cm>埋深 20 cm；相同埋深水平下，1 管 2 行>2 管 2 行>3 管 2 行。

3)微润管埋深10 cm，3管2行下，番茄的株高、果实形态、单株产量及总产量最高；埋深10 cm，1管2行下灌溉水分利用效率最高；埋深30 cm，1管2行下维生素C、可溶性糖含量和糖酸比最大，综合品质排序第1。综合考虑总产量、灌溉水分利用效率、品质及微润管的经济成本等因素，埋深10 cm，1管2行，番茄总产量为87.38 $t \cdot hm^{-2}$，灌溉水分利用效率达到108.91 $kg \cdot m^{-3}$，品质综合排序第3，为日光温室番茄种植较为适宜的微润灌溉技术参数。

参考文献 References

[1] 李天来．我国日光温室产业发展现状与前景[J]．沈阳农业大学学报, 2005, 36(2): 131–138
Li T L. Current situation and prospects of green house industry development in China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(2): 131–138

[2] Abdalhi M A M, 程吉林, 冯绍元, 等．滴灌条件下不同供水水平对温室番茄生长、产量及其品质的影响[J]．灌溉排水学报, 2016, 35(1): 36–41
Abdalhi M A M, Cheng J L, Feng S Y, et al. Response of greenhouse tomato growth, yield and quality to drip-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(1): 36–41

[3] Liu H, Duan A W, Li F S, et al. Drip irrigation scheduling for tomato grown in solar greenhouse based on pan evaporation in North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(3): 520–531

[4] Patel N, Rajput T B S. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato[J]. Agricultural Water Management, 2007, 88(1/3): 209–223

[5] 张辉, 张玉龙, 虞娜, 等．温室膜下滴灌灌水控制下限与番茄产量、水分利用效率的关系[J]．中国农业科学, 2006, 39(2): 425–432
Zhang H, Zhang Y L, Yu N, et al. Relationship between low irrigation limit and yield, water use efficiency of tomato in under-mulching-drip irrigation in greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(2): 425–432

[6] 诸葛玉平, 张玉龙, 李爱峰, 等．保护地番茄栽培渗灌灌水指标的研究[J]．农业工程学报, 2002, 18(2): 53–57
Zhuge Y P, Zhang Y L, Li A F, et al. Irrigation scheduling of tomato by subsurface irrigation with porous pipe in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 53–57

[7] 吴玉芹, 杨鹏, 刘思若．关于我国微灌技术发展的几点思考[J]．灌溉排水学报, 2015, 34(12): 1–4
Wu Y Q, Yang P, Liu S R. Thinking about the development of micro-irrigation technology in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(12): 1–4

[8] 张立坤, 窦超银, 李光永, 等．微润灌溉技术在大棚娃娃菜种植中的应用[J]．中国农村水利水电, 2013(4): 53–55
Zhang L K, Dou C Y, Li G Y, et al. Application of self-suction micro-irrigation to baby cabbage planting in greenhouses[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(4): 53–55

[9] 朱燕翔, 王新坤, 程岩, 等．半透膜微润管水力性能试验的研究[J]．中国农村水利水电, 2015(5): 23–25
Zhu Y X, Wang X K, Cheng Y, et al. Research on the hydraulic performance of semi-permeable membrane moistube[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(5): 23–25

[10] 杨文君, 田磊, 杜太生, 等．半透膜节水灌溉技术的研究进展[J]．水资源与水工程学报, 2008, 19(6): 60–63
Yang W J, Tian L, Du T S, et al. Research prospect of the water-saving irrigation by semi-permeable film[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(6): 60–63

[11] 张俊, 牛文全, 张琳琳, 等．初始含水率对微润灌溉线源入渗特征的影响[J]．排灌机械工程学报, 2014, 32(1): 72–79
Zhang J, Niu W Q, Zhang L L, et al. Effects of soil initial water content on line-source infiltration characteristic in moistube irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(1): 72–79

[12] 牛文全, 张俊, 张琳琳, 等．埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J]．农业机械学报, 2013, 44(12): 128–134
Niu W Q, Zhang J, Zhang L L, et al. Effects of buried depth and pressure head on water movement of wetted soil during moistube-irrigation[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(12): 128–134

[13] 薛万来, 牛文全, 张俊, 等．压力水头对微润灌土壤水分运动特性影响的试验研究[J]．灌溉排水学报, 2013, 32(6): 7–11
Xue W L, Niu W Q, Zhang J, et al. Effects of hydraulic head on soil water movement under moistube-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 7–11

[14] 何玉琴, 成自勇, 张芮, 等．不同微润灌溉处理对玉米生长和产量的影响[J]．华南农业大学学报, 2012, 33(4): 566–569
He Y Q, Cheng Z Y, Zhang R, et al. Effects of different ways of micro-moist irrigation on growth and yield of maize[J]. Journal of South China Agricultural University, 2012, 33(4): 566–569

[15] 薛万来, 牛文全, 张子卓, 等．微润灌溉对日光温室番茄生长及水分利用效率的影响[J]．干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 61–66
Xue W L, Niu W Q, Zhang Z Z, et al. Effects of the tomato growth and water use efficiency in sunlight greenhouse by moistube-irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(6): 61–66

[16] 魏镇华, 陈庚, 徐淑君, 等．交替控水条件下微润灌溉对番茄耗水和产量的影响[J]．灌溉排水学报, 2014, 33(4/5): 139–143
Wei Z H, Chen G, Xu S J, et al. Responses of tomato water consumption and yield to moistube-irrigation under controlled alternate partial root-zone Irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(4/5): 139–143

[17] 张子卓, 张珂萌, 牛文全, 等．微润带埋深对温室番茄生长和土壤水分动态的影响[J]．干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 122–129

Zhang Z Z, Zhang K M, Niu W Q, et al. Effects of burying depth on growth of tomato and soil moisture dynamics by moistube-irrigation in green house[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(2): 122–129

[18] 何华, 康绍忠, 曹红霞. 地下滴灌埋管深度对冬小麦根冠生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 31–33
He H, Kang S Z, Cao H X. Effect of lateral depth on root and seedling growth and water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6): 31–33

[19] 谢海霞, 何帅, 周建伟, 等. 灌溉量及滴灌管埋深对无膜地下滴灌棉花产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 134–136
Xie H X, He S, Zhou J W, et al. Effect of irrigation amount and buried depth of drip irrigation tape on cotton production in subsurface drip irrigation and no mulch plastic film farmland[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 134–136

[20] 刘玉春, 李久生. 毛管埋深和土壤层状质地对地下滴灌番茄根区水氮动态和根系分布的影响[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 782–790
Liu Y C, Li J S. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrate dynamics and root distribution for drip fertigated tomato[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 782–790

[21] 农业部. 水肥一体化技术指导意见[J]. 中国农技推广, 2013, 29(3): 20–22
Ministry of Agriculture of China. Issued guidance on the integration of water and fertilizer technology[J]. China Agricultural Technology Extension, 2013, 29(3): 20–22

[22] 张明智, 牛文全, 王京伟, 等. 微润管布置方式对夏玉米苗期生长的影响[J]. 节水灌溉, 2016(3): 80–83
Zhang M Z, Niu W Q, Wang J W, et al. Effect of moistube arrangements on the growth of maize at seedling stage[J]. Water Saving Irrigation, 2016(3): 80–83

[23] 李波, 任树梅, 杨培岭, 等. 供水条件对温室番茄根系分布及产量影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 39–44
Li B, Ren S M, Yang P L, et al. Impacts of different water supply on root distribution and yield of tomato in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 39–44

[24] 刘国宏, 谢香文, 王则玉. 微润灌毛管不同布设方式对新定植红枣生长的影响[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(2): 248–253
Liu G H, Xie X W, Wang Z Y. Effects of different layout methods of micro-run irrigation tube for the growth of newly-planted date trees[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(2): 248–253

[25] 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 棉花膜下滴灌毛管布置方式的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 45–48
Cai H J, Shao G C, Zhang Z H. Lateral layout of drip irrigation under plastic mulch for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 45–48

[26] 罗勤, 陈竹君, 闫波, 等. 水肥减量对日光温室土壤水分状况及番茄产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 449–457
Luo Q, Chen Z J, Yan B, et al. Effects of reducing water and fertilizer rates on soil moisture and yield and quality of tomato in solar greenhouse[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 449–457

[27] 唐丽, 张泽锦, 李跃建. 膜下滴灌水量对避雨栽培番茄产量和品质的影响[J]. 节水灌溉, 2015(12): 44–46
Tang L, Zhang Z J, Li Y J. Effect of subsurface drip irrigation quantity on yield and quality of tomato under sheltered cultivation[J]. Water Saving Irrigation, 2015(12): 44–46

[28] 蒋树芳, 万书勤, 冯棣, 等. 地下滴灌不同埋深对番茄产量和灌溉水利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2015(8): 26–28
Jiang S F, Wan S Q, Feng D, et al. Response of tomato yield and irrigation water use efficiency under subsurface drip irrigation at different lateral depths[J]. Water Saving Irrigation, 2015(8): 26–28

[29] 张俊. 微润线源入渗湿润体特性试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013
Zhang J. Experimental study on characters of wetted soil from line-source infiltration in moistube irrigation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013

[30] 李元, 牛文全, 许健, 等. 加气滴灌提高大棚甜瓜品质及灌溉水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 147–154
Li Y, Niu W Q, Xu J, et al. Aerated irrigation enhancing quality and irrigation water use efficiency of muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 147–154

[31] 吴雪, 王坤元, 牛晓丽, 等. 番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 119–127
Wu X, Wang K Y, Niu X L, et al. Construction of comprehensive nutritional quality index for tomato and its response to water and fertilizer supply[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 119–127

[32] 夏秀波, 于贤昌, 高俊杰. 水分对有机基质栽培番茄生理特性、品质及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2710–2714
Xia X B, Yu X C, Gao J J. Effects of moisture content in organic substrate on the physiological characters, fruit quality and yield of tomato plant[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2710–2714

[33] 田义, 张玉龙, 虞娜, 等. 温室地下滴灌灌水控制下限对番茄生长发育、果实品质和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 88–92
Tian Y, Zhang Y L, Yu N, et al. Effect of different low irrigation limit on growth, quality and yield of tomato under subsurface drip irrigation in greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(5): 88–92

[34] Mahajan G, Singh K G. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1/2): 202–206

[35] 刘玉春, 李久生. 毛管埋深和层状质地对番茄滴灌水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 7–12
Liu Y C, Li J S. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrogen use efficiency of drip irrigated tomato[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 7–12